**2001 춘계학술발표회 논문집**
**한국원자력학회**

# 긴 관에 대한 간단한 이류체 임계유동모델

## A Simple Two-Phase Critical Flow Model for Long Pipes

**박 춘경, 이 성재, 송 철화, 정 문기**

**한국원자력연구소**

**대전광역시 유성구 유성사서함** 105

**요약**

용기나 배관에서의 파열부를 통한 flashing 유량을 계산할 수 있는 이류체 임계유동모델을 개발하였다. 이 모델은 입구조건이 과냉 또는 이류체일 경우에 대하여 모두 적용할 수 있다. 실험유체가 물인 여러 임계유동실험 결과와 본 모델과의 비교를 통하여 제안된 임계유동모델의 타당성을 검증하였다. 또한 잘 알려진 여러 이론모델과 비교, 평가 작업을 수행하였다. 그 결과 제안된 모델은 긴 관이나 *L/D* 가 큰 형태에서의 flashing 유동율을 잘 예측할 수 있는 것으로 밝혀졌다.

**Abstract**

A simple two-phase critical flow model is developed for estimating flashing flow rates through breaches in vessels or pipeworks. The model considers both subcooled and saturated conditions. The model has been tested against an extensive set of data from critical flow experiments with water as the test fluid. In addition, comparison of the predictions with other theoretical models is made. Results show that present model adequately predicts flashing flow rates through long pipes or large *L/D* geometries.

## 1. 서론

용기나 배관에서의 파열부를 통한 flashing 유량을 정확하게 예측할 수 있는 능력의 확보는 수냉각 원자력발전소의 안정성 해석에 매우 중요하다. 지난 수십년간 관, nozzle, slit 등을 통한 물-증기 혼합체의 임계유동에 대한 많은 실험적 연구가 있었고, 여러 이론적 모델이 개발된 바 있다. 그러나 어떠한 해석모델도 만족할만한 결과를 제시하지 못하고 있다 [1]. Richter [2] 모델이나 general drift flux (GSL) [1] 등 space-dependent model 등은 해석모델 보다 나은 결과를 제시하여 준다. 그러나 이 모델을 사용하는 것은 쉽지 않으며, 또한 이 모델들은 Marviken [3] 실험결과를 잘 예측할 수 없는 것으로 알려졌다 [1].

최근에 긴 관이나 slit 등을 통한 임계유량을 계산할 수 있는 간단한 상관관계식이 개발되었다 [4,5]. 이 상관관계식은 매우 간단하며 손계산으로 임계유량을 정확하게 계산할 수 있다. 그러나 이 식은 입구가 과냉상태인 경우만 유량을 계산할 수 있는 단점이 있다. 본 논문은 이 상관관계식을 입구가 이류체 조건인 경우까지

사용할 수 있도록 확장시킨다. 새로운 모델을 여러 실험결과에 적용하였고, 또한 이론적 모델의 결과와 비교, 평가하였다.

**2. 모델 개요**

파단부 형태 (입구 형태, 형상, 직경, 길이 등) 에 영향을 받지 않는 이류체 임계 질량유속 ($G_c$) 과 정체온도 ($T_o$) 사이의 관계를 얻기 위하여 박 [4,5] 등은 다음과 같은 두가지 무차원변수를 정의하였다. 이들은 무차원 질량유속 ($G^*$) 과 무차원 과냉도 ($\Delta T^*_{sub}$) 이며 다음과 같이 정의된다:

$$G^* \equiv \frac{G_c}{G_{ref}} \tag{1}$$

및

$$\Delta T^*_{sub} \equiv \frac{T_{sat} - T_o}{T_{sat} - T_{ref}} \tag{2}$$

여기서,

$$G_{ref} = (C_d)_{ref} \cdot \left[2\, r_{ref}\, (P_o - P_b)\right]^{0.5} \tag{3}$$

그리고

$$(C_d)_{ref} = \left(1 + K + f\frac{L}{D}\right)_{ref}^{-0.5} \tag{4}$$

이 식들에서 $G_{ref}$ 및 $(C_d)_{ref}$ 는 초기 압력분포 ($P_o$ 및 $P_b$) 와 $T_{ref}$ = 20 °$C$ 인 물이 파열부를 흐를 때의 질량유속과 그 때의 방출계수 (discharge coefficient) 이다.

박 등은 $G^*$ 가 $\Delta T^*_{sub}$ 의 함수로 다음과 같이 표현될 수 있음을 증명하였다 [4,5]:

$$G^* = 1 - \frac{15.2}{1 + \exp[(\Delta T^*_{sub} + 0.578)/0.188]} \tag{5}$$

최종적으로 입구가 과냉상태인 조건에 대한 긴 관이나 slit 에 대한 임계 질량유속은 다음과 같이 표현된다:

$$G_c = (C_d)_{ref}\left[2\, r\, (P_o - P_b)\right]_{ref}^{0.5} \cdot \left(1 - \frac{15.2}{1 + \exp\left[(\Delta T^*_{sub} + 0.578)/0.188\right]}\right) \tag{6}$$

주어진 유동조건 (파열부 형상, 정체 조건, receiving end pressure) 에서 $(C_d)_{ref}$ 가 계산될 수 있다면 임계질량유속은 6 식에 의하여 쉽게 계산될 수 있다.

입구가 이류체인 경우에 대하여는 다음과 같은 식이 추천된다:

$$G_{TP} = \left[\frac{1 - x_o}{G^3_{x_o=0}} + \frac{x_o}{G^3_{x_o=1}}\right]^{-\frac{1}{3}} \tag{7}$$

여기서 $G_{x_o=0}$ 는 포화수의 임계질량유속이며, 6 식에 $\Delta T^{*}_{sub}$ = 0.0 을 대입하면 그 값이 얻어진다. $G_{x_o=1}$ 은 순수 증기에 대한 질량유속으로 다음과 같이 표현된다:

$$G_{x_o=1} = C_{dg}\left\{\left(\frac{2k}{k-1}\right)\left(\frac{P_o}{v_o}\right)\left[\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}} - \left(\frac{2}{k-1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}\right]\right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (8)$$

이 식에서 $C_{dg}$ 는 순수 증기의 방출계수이다.

## 2. 결과 및 토의

현재의 모델을 여러 연구자의 실험결과와 비교하여 검증하였다. 실험 자료는 수평 및 수직 방향 실험부를 모두 포함한다. 또한 현재 널리 사용되고 있는 이론모델과 본 모델을 이 실험자료를 이용하여 비교, 평가하였다.

본 모델을 사용하기 위하여는 $(C_d)_{ref}$ 와 $C_{dg}$ 의 값을 구하여야 한다. $K$ 와 $f$ 값이 주어진 경우 [4,6,7] $(C_d)_{ref}$ 는 4 식으로 계산하였다. 그 외의 경우에는, 주어진 실험에서, 가장 낮은 온도에 대한 $(C_d)_{ref}$ 값을 6 식으로 구하고 그 값을 비슷한 압력조건에 대한 임계유량 계산에 사용하였다. $C_{dg}$ 값은 일반적으로 $(C_d)_{ref}$ 값보다 크다. 그러나 그 값이 주어진 자료가 없기 때문에 $(C_d)_{ref}$ 값을 그대로 사용하였다. 이러한 가정은 유량계산에 영향을 미칠 수 있다, 그러나 포화수의 임계유량 값이 증기에 대한 유량보다 크기 때문에 그 영향은 매우 작을 것으로 예상된다.

현 모델에 의한 계산값과 실험자료와의 일치 정도를 판단하기 위한 통계학적 인자로 상대평균차이 $(\overline{X})$ 와 상대표준편차 (σ) 가 사용되었다. 이들은 아래와 같이 정의된다:

$$\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i \qquad (9)$$

또한

$$s = \left(\sum_{i=1}^{n}\frac{(X_i - \overline{X})^2}{n-1}\right)^{0.5} \times 100\ \% \qquad (10)$$

여기서

$$X_i = \left(\frac{G_{\exp} - G_{corr}}{G_{\exp}}\right)_i \times 100\ \% \qquad (11)$$

이 식들에서의 $G_{exp}$ 와 $G_{corr}$ 는 실험시 측정된 임계질량유속과 예측치를 의미하며, $n$ 은 실험자료의 수이다.

### 3.1 실험자료와 모델 예측치와의 비교

과냉된 물의 임계질량유속에 대한 관계식 (6 식) 이 여러 실험자에 의하여

생산된 실험자료와 비교, 평가되었다. 이 실험자료는 총 13 명의 실험에 의한 자료로 수평 및 수직 형태의 실험부가 두루 사용되었다. Table 1 에 예시된 것과 같이 총 실험자료의 수는 1284 개이며, 압력범위는 0.1 ~ 16.2 *MPa*, 실험부 직경은 0.25 ~ 509 *mm*, 길이는 40 ~ 2,335 *mm* 에 걸쳐 있다.

6 식에 의하여 계산된 임계질량유속과 실험치와의 일치 정도가 Table 1 에 표시되어 있다. 표에서 보는 바와 같이 본 모델은 입구 유체가 과냉상태인 경우에 대한 임계질량유속을 잘 예측하고 있다. 즉 상대평균차이는 8 % 이하이고 상대 표준편차는 대체적으로 10 % 이하이다. 실험조건에 다양한 실험부 형태, 직경과 길이, 정체조건, 유동 방향 등 서로 다른 여러 요소가 모두 포함된 것을 감안하면 모델의 예측도는 매우 좋다고 할 수 있다.

입구 유체가 이류체인 경우에 대한 모델 (7 식) 의 검증이 여러 실험자료와의 비교를 통하여 이루어졌다. 사용된 실험자료의 수는 267 개이며, 압력범위는 3.0 ~ 10.0 *MPa*, 직경은 5.2 *mm* 에서 76.2 *mm,* 그리고 길이는 76 *mm* 에서 1,778 *mm* 사이에 있다 (Table 2 참조).

Table 1. Predictions of the subcooled inlet critical flow data with the Park model

| Experiment | Pressure (*MPa*) | Hydraulic Diameter, *D* (*mm*) | Flow Length, *L* (*mm*) | *L/D* | No. of Data | $\bar{X}$ (%) | s (%) | Remarks |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Amos et. al.[6] | 4.1 ~ 16.2 | 0.25 ~ 0.76 | 63.5 | > 83 | 72 | - 4.4 | 10.4 | Slit Down Flow |
| Ardron et al. [8] | 0.2 ~ 0.4 | 26.3 | 1,015 | 38.6 | 31 | 18.5 | 12.1 | Tube Horizontal |
| Boivin[9] | 2.0 ~ 10.1 | 12 ~ 50 | 700 ~ 2,305 | > 37 | 21 | - 7.6 | 11.4 | Tube Horizontal |
| Celata et. al.[10] | 0.8 ~ 2.3 | 4.6 | 46 ~ 1,380 | > 10 | 60 | - 3.2 | 6.0 | Tube Down Flow |
| Fincke et al. [11] | 0.1 ~ 0.3 | 18.28 | 216 | 11.8 | 92 | - 2.4 | 3.3 | Tube Horizontal |
| Jeandey et. al. [12] | 2.0 ~ 12.0 | 20.13 | 363 | 18.0 | 88 | - 2.4 | 6.8 | Tube Up Flow |
| John et. al. [7] | 4.0 ~ 14.0 | 0.41 ~ 1.28 | 46.0 | > 35 | 57 | 2.5 | 9.9 | Slit Down Flow |
| Marviken [3] | 2.0 ~ 5.0 | 200,<br>300,<br>500 | > 590<br>> 511<br>> 730 | > 2.9<br>> 1.7<br>> 1.5 | 386 | 1.0 | 5.7 | Transient Pipe Down Flow |
| Super Mobydick[13] | 3.0 ~ 10.0 | 5.2<br>15.5 | 76<br>156 | 14.6<br>10 | 28<br>28 | -1.6 | 5.6 | Tube Up Flow |
| Reocreux[14] | 0.21~0.34 | 20 | 2,335 | 117 | 39 | - 1.8 | 5.9 | Tube Up Flow |
| Seynhaeve[15] | 0.3 ~ 1.0 | 12.5 | 541 | 43.3 | 57 | - 2.0 | 6.7 | Tube Up Flow |
| Sozzi et. al. [16] | 6.2 | 28 | 228.5 | - | 2 | 3.2 | 5.8 | Transient, Venturi Horizontal |
| Sozzi et. al. [16] | 5.7 ~ 7.0 | 12.7 | 108 ~ 1,778 | > 5 | 149 | - 0.9 | 10.5 | Transient, Tube, Horizontal |
| Park [4] | 0.5 ~ 2.0 | 1.0 ~ 7.15 | 40 ~ 400 | > 11 | 174 | - 2.4 | 5.8 | Tube Horizontal |

Fig. 1 은 Table 2 에 있는 실험자료와 모델에 의한 계산값을 비교한 것으로 모델은 이류체에 대하여도 임계질량유속을 잘 예측하고 있다. 총 267 개의 실험자료에 대한 상대평균차이는 –1.1 % 이고 상대표준편차는 8.3 % 이다.

Table 2. Predictions of the two-phase inlet critical flow data with the Park model

| Experiment | Pressure (*MPa*) | Hydraulic Diameter, *D* (*mm*) | Flow Length, *L* (*mm*) | *L/D* for Tube | No. of Data | $\bar{X}$ (%) | s (%) | Remarks |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Super Mobydick[13] | 3.0 ~ 10.0 | 5.2,<br>15.5 | 76<br>156 | 14.6<br>10 | 9<br>20 | -0.4 | 9.6 | Tube Up Flow |
| Sozzi et. al. [16] | 2.7 ~ 7.0 | 12.7 | 108 ~ 1,778 | > 5.0 | 228 | 0.6 | 8.0 | Transient, Tube Horizontal |
| Sozzi et. al. [16] | 6.3 ~ 6.9 | 54 | 1,112 | - | 4 | -12.6 | 3.9 | Transient, Venturi Horizontal |
| Sozzi et. al. [16] | 6.5 ~ 6.7 | 76.2 | 1,076 | - | 3 | -19.3 | 5.3 | Transient, Venturi Horizontal |
| Sozzi et. al. [16] | 6.8 | 28 | 228.5 | - | 3 | 4.2 | 8.5 | Transient, Venturi Horizontal |

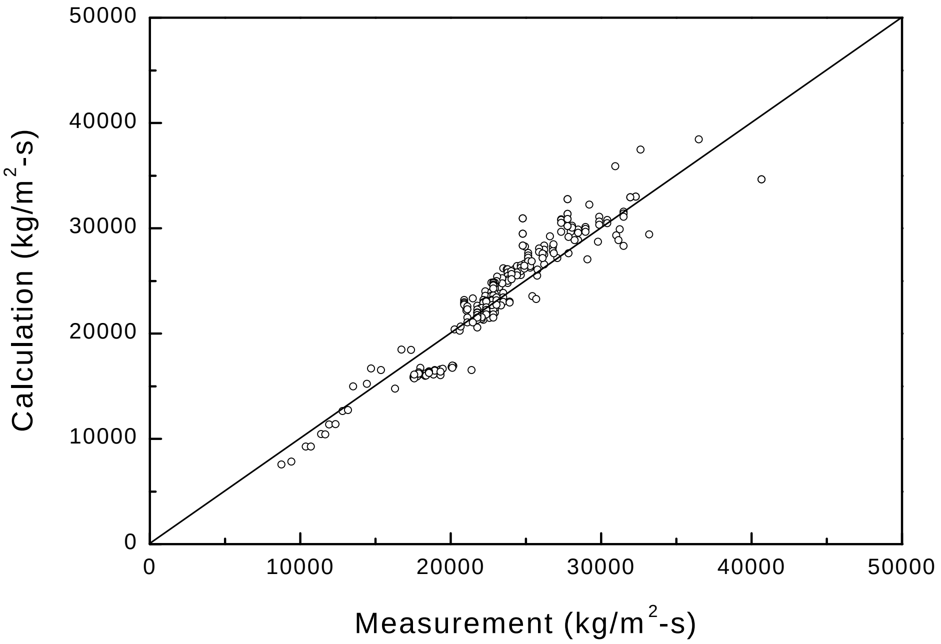


Fig. 1. Comparison between the model predictions and the test data in Table 2

본 논문에서 제시하는 모델에 의한 임계질량유속과 실험자료는 잘 일치하고 있다. 이들 실험이 다양한 실험부 크기 및 길이, 실험부 형태, 유동방향, 및 정체조건 등에서 수행된 것을 감안한다면 본 모델의 정확도는 좋다고 할 수 있다. 본 논문에서 제시된 모델은 다음과 같은 실험부 형태의 임계질량유속을 계산하는데 사용될 수 있다: (1) 직경이 0.25 ~ 76.2 *mm* 사이이고, *L/D* 가 8 보다 크며, 길이가 40 *mm* 인 경우, (2) 직경이 200 *mm* 보다 크고 *L/D* 가 1.5 보다 큰 경우.

### 3.2 이론식과의 비교

본 모델의 타당성을 입증하기 위하여 가장 적절한 실험자료 [17] 를 선정하였고, 본 모델과 가장 많이 사용되는 이론식을 사용하여 실험자료를 예측하였다. Table 3 은 해석식과의 비교에 사용된, 입구가 과냉상태인, 가장 신뢰성 있는 실험자료를 표시하고 있다. 또한 Table 4 는 임계유량에 대한 해석식 및 space-dependent model 들과의 비교에 사용된 실험자료를 표시하고 있다. 비교에 사용된 해석식 에는 Moody model [18], Henry-Fauske model [19], 및 Homogeneous Equilibrium model (HEM) [1] 이 있고, space-dependent model 에는 Elias-Chambre model [20], Richter model [2], 및 general drift flux (GSL) model [1] 이 포함된다.

Table 3. Selected subcooled inlet critical flow data for the analytic models

| **Experiment** | **Pressure (*MPa*)** | **Hydraulic Diameter, *D* (*mm*)** | **Flow Length, *L* (*mm*)** | ***L/D*** | **No. of Data** | **Remarks** |
|---|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ardron et al. [8]** | **0.2 ~ 0.4** | **26.3** | **1,015** | **38.6** | **31** | **Tube Horizontal** |
| **Boivin - 1[9]** | **2.0 ~ 10.1** | **12** | **700** | **58.3** | **10** | **Rounded Entrance Tube + Diffuser Horizontal** |
| **Boivin – 2[9]** | **2.0 ~ 10.1** | **30** | **2,305** | **76.8** | **6** | **Rounded Entrance Tube + Diffuser Horizontal** |
| **Boivin – 3 [9]** | **2.0 ~ 10.1** | **50** | **2240** | **44.8** | **5** | **Rounded Entrance Tube + Diffuser Horizontal** |
| **Fincke et al. [11]** | **0.1 ~ 0.3** | **18.28** | **216** | **11.8** | **92** | **Tube + Diffuser Horizontal** |
| **Jeandey et. al. – 1 [12]** | **2.0 ~ 12.0** | **20.13** | **363** | **18.0** | **15** | **Nozzle + Tube Up Flow** |
| **Jeandey et. al.- 2 [12]** | **2.0 ~ 12.0** | **20.13** | **363** | **18.0** | **73** | **Nozzle + Tube Up Flow** |
| **Reocreux[14]** | **0.21 ~ 0.34** | **20** | **2,335** | **117** | **28** | **Tube + Diffuser Up Flow** |
| **Seynhaeve – 1[15]** | **0.3 ~ 1.0** | **12.5** | **541** | **43.3** | **26** | **Tube + Diffuser Up Flow** |
| **Seynhaeve – 2[15]** | **0.3 ~ 1.0** | **12.5** | **541** | **43.3** | **31** | **Tube + Tube Up Flow** |

해석식과 space-dependent model 에 의한 결과가 본 논문의 모델 결과와 비교되었다. Tables 3 및 4 에 있는 실험자료에 대한 본 모델 및 해석식에 의한 계산결과가 Table 5 및 Fig. 2 에 각각 표시되어 있다. 표와 그림에서 보는 바와 같이 본 모델의 정확도는 해석식 보다 월등하다.

Elias et al. [1] 에 의하면 일반적으로 space-dependent model 의 정확도가 해석식 보다 좋다. 그들은 또한 임계질량유속의 계산에 Richter model 과 GSL model 을 추천하였다. Richter model [2] 은 입구상태가 이류체인 경우에 대하여 정확도가 좋으며, 과냉상태에 대하여는 GSL model [1] 의 정확도가 좋은 것으로 판단되었다. Table 4 에 있는 실험자료에 대한 각 모델의 상대평균차이와 상대표준편차가 Fig. 3 및 4 에 표시되어 있다 (Space-dependent model 의 계산결과는 Elias et al. [1] 의 논문에서 인용되었다). 그림에서 보는 바와 같이 현 모델의 정확도는 일반적으로 space-dependent model 보다 좋다. 입구가 과냉상태인 경우 본 모델과 GSL model [1] 의 정확도는 서로 비슷하다. 한편 이류체인 경우에 대하여는 본 모델이 다른 모델보다 월등하며, 전체적으로 본 모델의 정확도가 다른 어떠한 모델보다 뛰어나다.

Table 4. Selected critical flow data for model comparison

| **Experiment** | **Pressure (*MPa*)** | **Hydraulic Diameter, *D* (*mm*)** | **Flow Length, *L* (*mm*)** | ***L/D*** | **No. of Data** | **Remarks** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Sozzi et. al. [16]** | **5.7 ~ 6.9** | **12.7** | **108** | **8.5** | **23** | **No. 2 Nozzle, Rounded Convergent + tube, Horizontal** |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Sozzi et. al.** [16] | **5.8 ~ 6.8** | **12.7** | **159** | **12.4** | **15** | **No. 2 Nozzle, Rounded Convergent + tube, Horizontal** |
| **Sozzi et. al.** [16] | **6.3 ~ 6.9** | **12.7** | **235** | **18.5** | **12** | **No. 2 Nozzle, Rounded Convergent + tube, Horizontal** |
| **Sozzi et. al.** [16] | **6.0 ~ 7.0** | **12.7** | **273** | **21.5** | **22** | **No. 2 Nozzle, Rounded Convergent + tube, Horizontal** |
| **Sozzi et. al.** [16] | **5.7 ~ 6.8** | **12.7** | **362** | **28.5** | **19** | **No. 2 Nozzle, Rounded Convergent + tube, Horizontal** |
| **Sozzi et. al.** [16] | **6.0 ~ 6.8** | **12.7** | **553** | **43.5** | **13** | **No. 2 Nozzle, Rounded Convergent + tube, Horizontal** |
| **Sozzi et. al.** [16] | **6.4 ~ 6.9** | **12.7** | **679** | **53.5** | **96** | **No. 2 Nozzle, Rounded Convergent + tube, Horizontal** |
| **Sozzi et. al.** [16] | **6.1 ~ 6.9** | **12.7** | **1,823** | **143.5** | **81** | **No. 2 Nozzle, Rounded Convergent + tube, Horizontal** |
| **Sozzi et. al.** [16] | **6.0 ~ 6.9** | **12.7** | **195** | **18.9** | **23** | **No. 3 Nozzle, Tube, Horizontal** |
| **Sozzi et. al.** [16] | **6.0 ~ 6.9** | **12.7** | **322** | **28.9** | **24** | **No. 3 Nozzle, Tube, Horizontal** |
| **Sozzi et. al.** [16] | **6.1 ~ 6.9** | **12.7** | **513** | **43.9** | **24** | **No. 3 Nozzle, Tube, Horizontal** |
| **Sozzi et. al.** [16] | **6.0 ~ 6.9** | **12.7** | **640** | **53.9** | **17** | **No. 3 Nozzle, Tube, Horizontal** |

Table 5. Predictions of all the data in Table 3 using the Park and analytic models

| **Model** | **Moody** | | **Henry-Fauske** | | **HEM** | | **Park** | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Mean** | **s** | **Mean** | **s** | **Mean** | **s** | **Mean** | **s** |
| **Ardron et al.** [8] | **21.5** | **23.8** | **6.5** | **22.3** | **76.2** | **12.4** | **18.5** | **12.1** |
| **Bovin – 1** [9] | **-18.8** | **11.0** | **-50.0** | **17.2** | **-5.3** | **5.7** | **-4.4** | **7.5** |
| **Bovin – 2** [9] | **-41.0** | **17.0** | **-75.2** | **15.7** | **-14.4** | **27.9** | **-12.6** | **18.9** |
| **Bovin – 3** [9] | **-3.5** | **7.8** | **-28.6** | **12.1** | **8.3** | **9.6** | **-0.2** | **4.6** |
| **Fincke et al.** [11] | **-2.9** | **2.9** | **-1.8** | **2.5** | **-2.9** | **2.9** | **-2.4** | **3.3** |
| **Jeandey et al. –1** [12] | **-12.0** | **1.8** | **-28.2** | **13.1** | **-3.9** | **10.4** | **-5.4** | **5.0** |
| **Jeandey et al. –2** [12] | **-8.1** | **9.3** | **-29.3** | **16.3** | **7.6** | **12.4** | **-1.8** | **7.0** |
| **Reocreux** [14] | **-65.7** | **10.8** | **-84.0** | **26.4** | **-68.0** | **12.0** | **-1.4** | **6.3** |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Seynhaeve – 1 [15]** | **-12.8** | **3.5** | **-24.0** | **12.3** | **-11.2** | **3.3** | **-1.8** | **6.3** |
| **Seynhaeve – 2 [15]** | **-9.4** | **5.5** | **-25.1** | **12.1** | **-8.9** | **5.9** | **-2.2** | **7.2** |

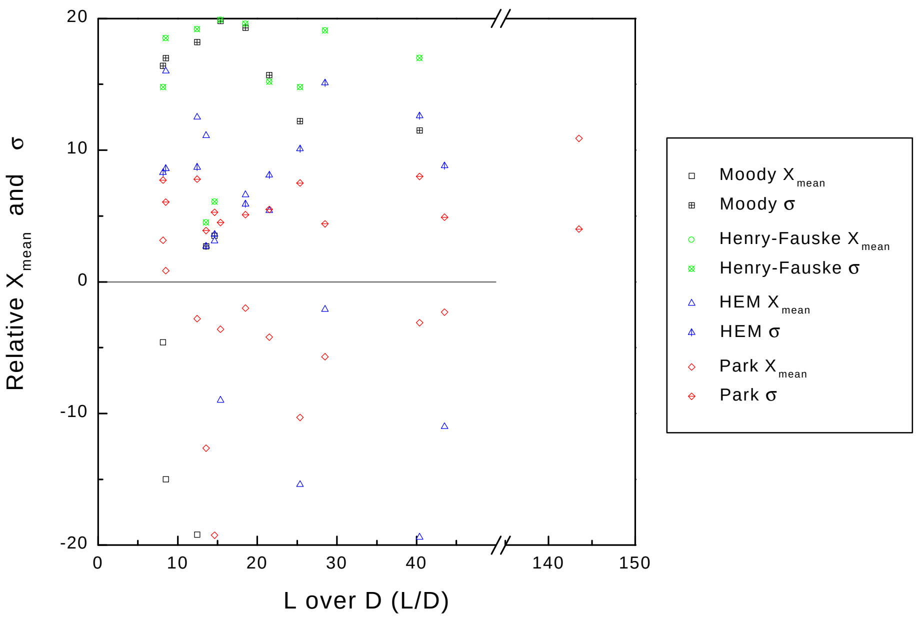


Fig. 2. Comparison of calculated relative mean differences and standard deviations between the model and the analytic models for the data in Table 4

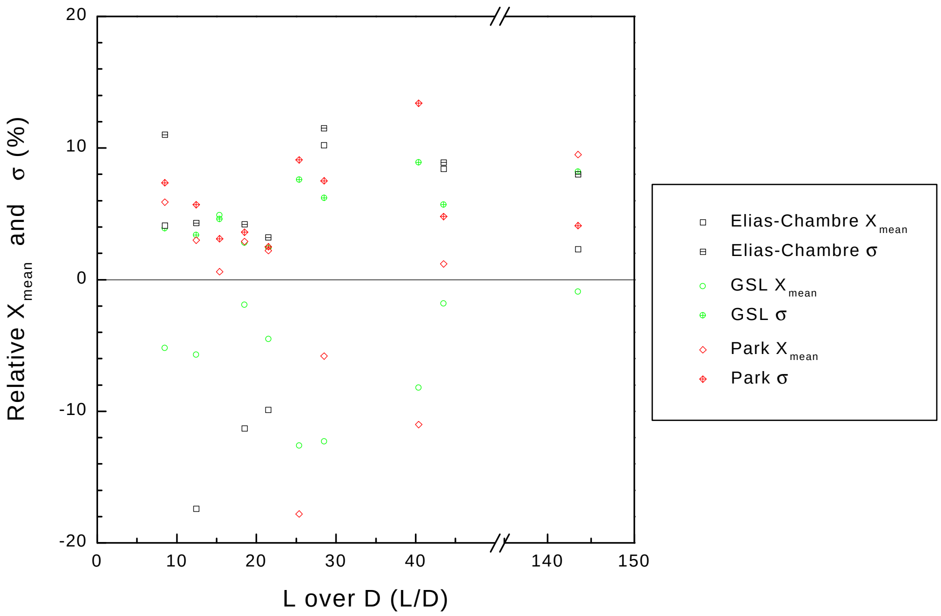


Fig. 3. Comparison of calculated relative mean differences and standard deviations

between the model and the space-dependent models for subcooled inlet data in Table 4

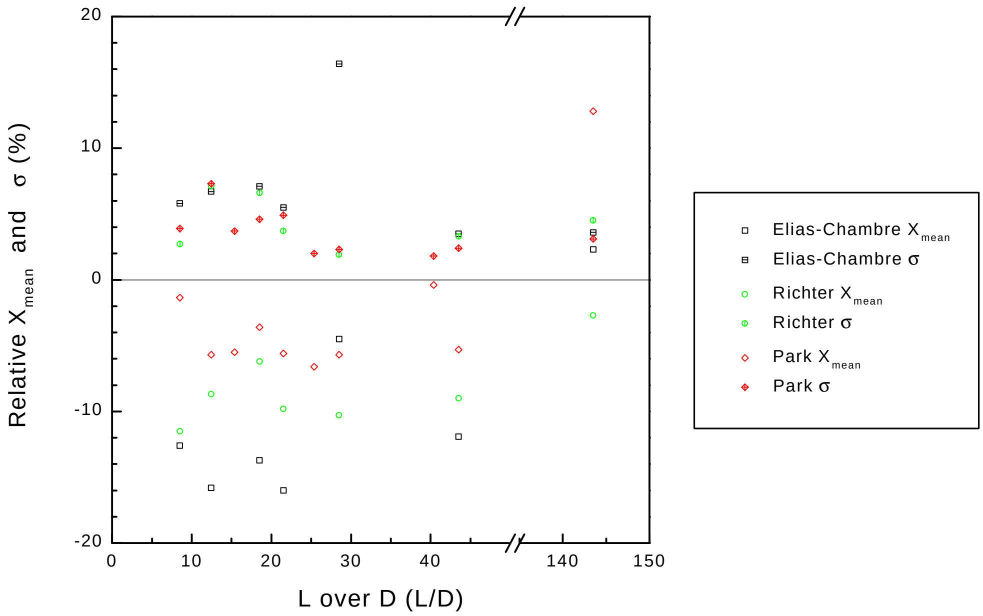


Fig. 4. Comparison of calculated relative mean differences and standard deviations between the model and the space-dependent models for the two-phase inlet data in Table 4

**4. 결론**

**용기나 배관에서의 파열부를 통한** flashing **유량을 계산할 수 있는 이류체 임계유동모델을 제안하였다. 이 모델은 입구조건이 과냉 또는 이류체일 경우에 대하여 모두 적용할 수 있다. 실험유체가 물인 여러 임계유동실험 결과와 본 모델과의 비교를 통하여 제안된 임계유동모델을 검증하였다. 또한 잘 알려진 여러 이론모델과 비교, 평가 작업을 수행하였다. 그 결과 제안된 모델은 긴 관이나** *L/D* **가 큰 형태에서의** flashing **유동율을 잘 예측하였으며, 다른 모델보다 정확도가 월등하였다.**

**제안된 모델은 다음과 같은 경우에 대한 임계질량유속을 정확하게 계산할 수 있다.**

(1) **직경이** 0.25 - 76.2 *mm* **사이이고,** *L/D* **가** 8 **보다 크며, 길이가** 40 *mm* **인 경우**
(2) **직경이** 200 *mm* **보다 크고** *L/D* **가** 1.5 **보다 큰 경우.**


**Acknowledgement**

This project has been carried out under the Nuclear Research and Development Program by MOST.

## Nomenclature

| | |
|---|---|
| $(C_d)_{ref}$ | discharge coefficient evaluated at 20 $°C$ |
| $C_{dg}$ | discharge coefficient of pure vapor |
| $D$ | diameter, *mm* |
| $f$ | friction factor |
| $G$ | mass flux, $kg/m^2 \cdot s$ |
| $G_c$ | critical mass flux, $kg/m^2 \cdot s$ |
| $G_{ref}$ | mass flux evaluated at 20 $°C$, $kg/m^2 \cdot s$ |
| $G_{TP}$ | critical mass flux of two-phase inlet conditions, $kg/m^2 \cdot s$ |
| $G^*$ | dimensionless mass flux, $G_c / G_{ref}$ |
| $K$ | pipe entrance loss coefficient |
| $k$ | ratio of specific heats |
| $L$ | (total) length of test section, *mm* |
| $n$ | number of data |
| $P$ | pressure, *MPa* |
| $P_b$ | back pressure, *MPa* |
| $P_o$ | stagnation pressure, *MPa* |
| $T$ | temperature, $°C$ |
| $T_o$ | stagnation temperature, $°C$ |
| $T_{ref}$ | reference temperature, 20 $°C$ |
| $\Delta T_{sub}$ | subcooling, $°C$ |
| $\Delta T^*_{sub}$ | dimensionless subcooling, $(T_{sat} - T_o)/(T_{sat} - T_{ref})$ |
| $v_o$ | specific volume of steam, $m^3/kg$ |
| $x_o$ | quality |
| $r$ | density of water, $kg/m^3$ |

Subscript

| | |
|---|---|
| $b$ | receiver system |
| $c$ | critical |
| $o$ | stagnation condition |
| $ref$ | values at 20 $°C$ |
| $sat$ | saturation condition |
| $TP$ | two-phase condition |
| $x_o = 0$ | saturated water |
| $x_o = 1$ | all vapor |

Superscript

| | |
|---|---|
| * | dimensionless |

## References


[1] E. Elias and G.S. Lellouche, "Two-Phase Critical Flow," *Int. J. Multi-phase Flow*, Vol. 20, Suppl., pp. 91-168, 1994

[2] H.J. Richter, “Separated Two-Phase Flow Model: Application to Critical Flow,” EPRI NP-1800, 1981

[3] The Marviken Full Scale Critical-Flow Tests, NUREG/CR-2671, MXC-301, 1982

[4] C.K. Park, “An Experimental Investigation of Critical Flow Rates of Subcooled Water

through Short Pipes with Small Diameters," Ph. D. Thesis, KAIST, Korea, 1997
[5] C.K. Park, J.W Park, M.K. Chung, and M.H. Chun, " An Empirical Correlation for Critical Flow Rates of Subcooled Water Through Short Pipes with Small Diameters," *J. Kor. Nucl. Soc.*, Vol. 29, No. 1, pp. 35-44, 1997
[6] C.N. Amos and V.E. Schrock, "Two-Phase Critical Flow in Slits," NUREG/CR-3475, 1983
[7] H. John et al., "Critical Two-Phase Flow through Rough Slits," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 14, No. 2, pp. 155-174, 1988
[8] D. H. Ardron and M.C. Ackerman, "Study of the Critical Flow of Subcooled Water in a Pipe," GEGB Report: RD/B/N4299, 1978
[9] J.Y. Boivin, "Two-Phase Critical Flow on Long Nozzles," *Nuclear Technology*, Vol. 46, Mid-Dec., 1979
[10] G.P. Celata et al., "Two-Phase Flow Models in Unbounded Two-Phase Critical flows," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 97, pp. 211-222, 1986
[11] J.R. Fincke and D.R. Collins, "The Correlation of Two Dimensional and Nonequilibrium Effects in Subcooled Choked Nozzle Flow," NUREG/CR-1907, EGG-2081, 1981
[12] C. Jeandey et al., "Auto Vaporization d'Ecoulements Eau/Vapeur," CEN de Grenoble, Report T.T. No. 163, 1981
[13] Bethsy Team, "Selected Results from Characterization Tests of the Bethsy Break Nozzles (2" and 6") Conducted in the Super Moby-Dick Facility," Addendum to NOTE SETh/ LES/90-104, CEN Grenoble
[14] M. Reocreux, "A Contribution l'Etude des Debits Critiques en Recoulement Diphasique Eau-Vapeur," Doctoral Dissertation a l'Universite Scientifique et de Grenoble, 1974
[15] J.M. Seynhaeve, "Etude Experimentale des Ecoulements Diphasiques Critiques a Faible Titre," Doctoral Dissertation, Universite Catholique de Louvain, France, 1980
[16] G.L. Sozzi and W.A. Sutherland, "Critical Flow of Saturated and Subcooled Water at High Pressure," NEDO-13418, 1975
[17] V. Ilic, S. Banerjee, and S. Behling, "A Qualified Data Base for the Critical Flow of Water," EPRI NP-4556, 1986
[18] F.J. Moody, "Maximum Two-Phase Vessel Blowdown from Pipes," *ASME J. Heat Transfer*, 1966
[19] R.E. Henry and H.F. Fauske, "The Two-Phase Critical Flow of One Component Mixtures in Nozzles, Orifices, and Short Pipes," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 93, 1971
[20] E. Elias and P.L. Chambrë, "A Mechanistic Non-Equilibrium Model for Two-Phase Critical Flow," *Int. J. Multiphase Flow*, **10**, 1, 1984